

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ БЕТОНА ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ

Кукунаев В.С., Потапов П.Г., Псурцева Н.А.

Национальный университет городского хозяйства им. О.М. Бекетова
г. Харьков, Украина

АННОТАЦИЯ: Виконано дослідження впливу сухого тертя («бетон по бетону») на роботу фрикційних пристроїв. Визначено величини опору демпфуючих пристроїв при статичному монотонному навантаженні.

АННОТАЦИЯ: Выполнены исследования влияния сухого трения («бетон по бетону») на работу фрикционных устройств. Определены величины сопротивления демпфирующих устройств при статическом монотонном нагружении.

ABSTRACT: The effect of dry friction ("Concrete Concrete") on the work friction devices is studied. The values of the resistance damping devices for static monotonic loading are determined.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: демпфирующие устройства, статическое монотонное нагружение, линейно-упругие элементы.

ВВЕДЕНИЕ

При решении упругопластических задач с применением методов динамики сооружений необходимо знать с достаточной степенью точности характеристики затухания для различных форм колебаний сооружения и зависимость этих характеристик от амплитуд колебаний. В специальной литературе указано немало способов аналитического учета затухания. Однако, достаточно точные действительные значения характеристик затухания не могут быть определены только теоретически. Обычно в литературе указываются лишь возможные пределы изменения этих

характеристик. Важнейшей задачей сейсмостойкости, да и вообще прикладной динамики сооружений, остается экспериментальное исследование затухания колебаний в различных сооружениях при различных формах колебаний, для разных материалов и видов напряженного состояния.

В настоящей работе рассматриваются результаты экспериментальных исследований влияния сухого трения («бетон по бетону») на работу фрикционных устройств. Целью экспериментов было определение величины сопротивления демпфирующих устройств при статическом монотонном нагружении. Объектами исследований стали: бетонные образцы, с помощью которых были предприняты попытки определения сопротивления при взаимном сдвиге, обусловленном «сухим» трением. Исследуемыми объектами являются два бетонных образца длиной 200 мм, шириной 120 мм и высотой 65 мм. Один из образцов расположен над другим образцом (фото 1), который снабжен упором для измерения взаимного смещения бетонных образцов, и закреплен через трос с чашей для сдвигающего груза (фото 1). На рис. 2 показан вид установки.

Основной задачей испытаний является определение зависимости скорости движения образца в виде функции от величины возникающих сил трения при сдвиге.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Запланировано исследовать изменение силы трения (скорости смещения) в зависимости от величины как нормальной, так и сдвигающей нагрузки.



Фото 1. Установка с двумя бетонными образцами

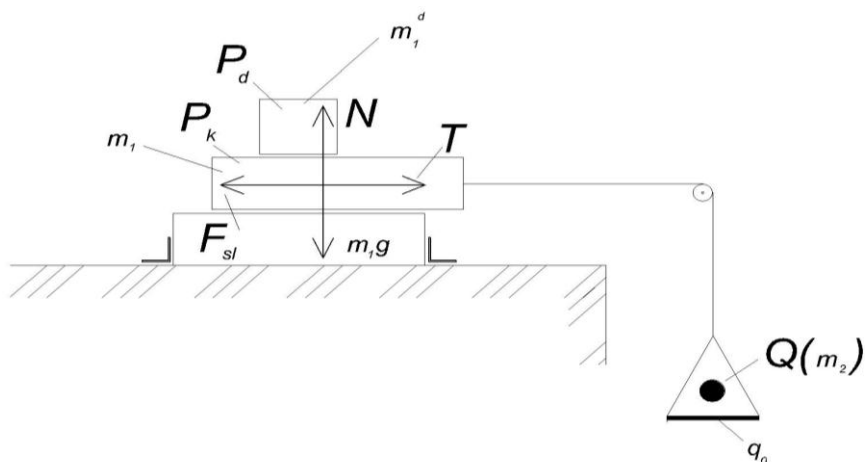


Рис. 1. Расчетная схема установки

Смысл решения данной задачи заключается в измерении времени движения образцов при взаимном их смещении на конечном отрезке пути движения. Нагрузка, вызывающая смещение, прикладывается равными ступенями нагружения. Кроме этого, начиная с некоторой ступени нагружения, применяется варьирование дополнительной нагрузкой, увеличивающей трение за счет обжатия площади контакта образца с плоскостью скольжения.

Используемые приборы, инструменты и приспособления: а) опытная установка, длина опытного хода штока - 30 мм ; б) набор лабораторных гирь и грузов весом 0,152Н; в) электронные весы марки «Vitek»; г) пылесос бытовой; д) видеокамера NikonD3100; е) штангенциркуль ШЦ-I; ж) секундомер в видеокамере NikonD3100.

На рис. 2 показана оснастка опытной установки, состоящая из двух металлических рам, примыкающих к контурам испытуемых образцов и обеспечивающих свободное взаимное смещение их в направлении поступательного движения, вызываемого нагрузкой Q.

Основные этапы проведения испытания следующие:

- подготовка установки для испытания опытного образца (нанесение на поверхности образца меток разметки длины и ширины образца);
- приложение сдвигающей нагрузки, равной 16,7 Н (1700г), на 1-й ступени нагружения (общая нагрузка с учетом веса чаши 190,5 г составляет 1890,5г или 18,6 Н;

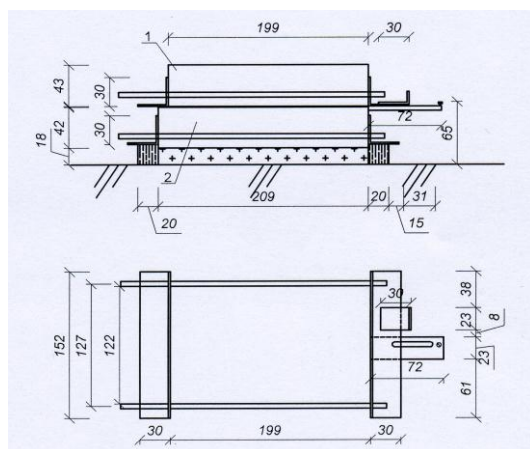


Рис. 2. Верхняя (1) и нижняя (2) рамы оснастки испытательной установки

- повторение опыта для 2-ой и последующих ступеней нагружения до значения, равного 19,6 Н (2000 г), с шагом 0,245 Н (25 г) ; во избежание образования пыли, образующейся вследствие многократного взаимного трения бетонных образцов; здесь рекомендуется применять пылеудаление при помощи пылесоса;

- то же, в целях варьирования обжатия площади контакта дополнительной нагрузкой (P_d) от 0,3 (30,4 г) до 1,49Н (152 г) с шагом 0,3Н (30,4г), прикладываемой к сдвигаемому образцу, начиная со ступени сдвигающей нагрузки, равной, с учетом веса чаши, для грузов 20,5 Н (Q);

- на каждом шаге испытаний фиксирование времени движения штока, соответствующего смещению опытного образца, путем записи на видеокамеру;

- повторение каждого опыта для каждой ступени сдвигающей нагрузки Q и варианта дополнительного нагружения P_d .

При опытных испытаниях исследовались свойства бетонных образцов при их взаимном сдвиге. В табл.1 показаны результаты полученных значений скорости движения опытного бетонного образца, предварительно подвергнутого специальной обработке поверхности путем шлифования.

На рис. 3 и 4 показаны построенные по данным табл. 1 сопоставительные графики изменения силы трения, проявляющейся при нагружении основной нагрузкой Q , в зависимости от скорости движения.

Таблица 1

Нагрузка Q (Н)	Скорость (v , мм/с) при значении пригруза (P_d) в Н:					
	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
16,7	14,56	43,62	36,39	15,19	15,19	7,31
16,9	34,29	26,38	17,51	10,18	10,18	7,23
17,2	38,99	22,81	12,22	10,69	10,69	8,11
17,4	44,94	31,03	20,91	14,11	14,11	8,79
17,7	46,33	28,15	17,99	14,76	14,76	8,04
17,9	50,68	42,11	34,75	27,05	27,05	16,55
18,2	50,66	53,96	46,70	46,02	42,81	34,88
18,4	53,27	54,06	52,86	51,48	48,04	46,07
18,6	55,94	56,75	54,01	53,00	47,97	46,98
18,9	59,91	60,17	54,13	53,18	49,58	45,67
19,1	62,79	57,49	55,92	58,12	46,46	45,33
19,4	69,30	61,31	60,15	58,12	52,49	51,28
19,6	74,01	63,68	63,63	64,49	62,24	55,03

Графики приведены для первой ступени дополнительного нагружения опытного образца вертикальной нагрузкой P_d . При этом, одновременно на графиках приведены обе зависимости как с учетом дополнительного нагружения испытываемого образца (с целью увеличения трения), так и без него. При построении графиков определение сил трения реализовано исходя из рассмотрения равновесия сил (рис. 1) [1]:

$$T - F_{sl} = m_1 a, \quad (1)$$

$$\text{где: } F_{sl} = kN = km_1 g; \quad a = 2s/t^2; \quad T = m_2(g - a),$$

$$\text{или: } m_2(g - a) - F_{sl} = m_2(g - a) - km_1 g = m_1 a,$$

$$\text{откуда коэффициент трения: } k = \frac{m_2(g - a) - m_1 a}{m_1 g} = \alpha - (1 + \alpha)\alpha_0, \quad (2)$$

$$\text{где } \alpha = m_2 / m_1 \quad (3) \text{ и } \alpha_0 = a / g. \quad (4)$$

$$\text{При этом, сила трения } F_{sl} = km_1 g = m_1 g[\alpha - (1 + \alpha)\alpha_0] \quad (5)$$

$$\text{или } F_{sl} = m_2 g + (m_2 - m_1)a = m_1 \left[\frac{m_2}{m_1}(g + a) - a \right]. \quad (5')$$

Тогда в рассматриваемом случае и представлении значений i -го уровня нагружения (3) и i -го относительного ускорения (4) в виде

$\{\alpha\}_i$ и $\{\alpha_0\}_i$ силу трения определяем так:

$$\{F_{sl}\}_i = [P_k + (P_d)_j][\{\alpha\}_i(g + \{\alpha\}_i) - \{\alpha\}_i], \quad (6)$$

где j - индекс целого типа вектора дополнительной нагрузки.

Показанные на рис. 3 и 4 графики силы трения (в зависимости от скорости движения бетонного образца) характеризуются прямолинейным и практически горизонтальным участками изменения силы трения. При этом, среднее ее значение составляет 20,0 Н при среднем значении коэффициента трения, равном 0,82. На этом же графике нанесены (сплошными кружочками) аналогичные значения в случае приложения к опытному образцу дополнительной вертикальной нагрузки P_d . Различие между значениями силы трения в обоих случаях оценивается коэффициентом вариации $v_1 = 0,003[2]$.

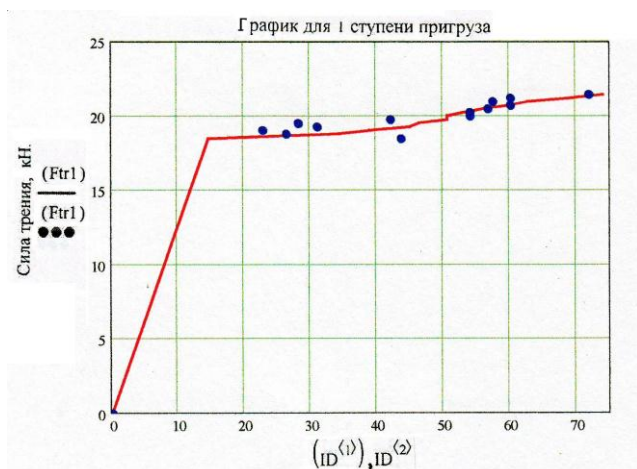


Рис. 3. График изменения силы трения для пригрузки, равного 30,4 г

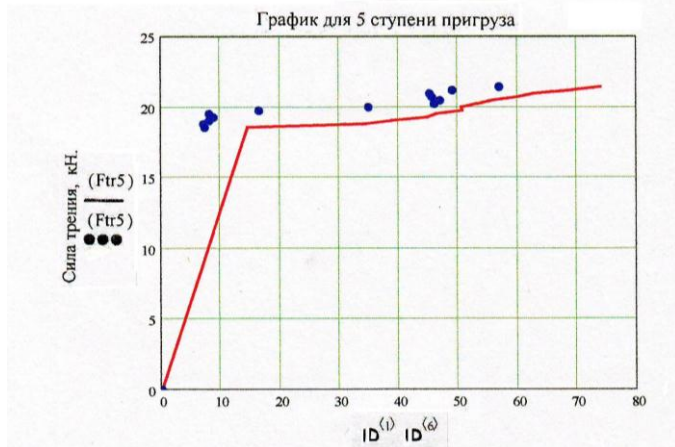


Рис. 4. График изменения силы трения для пригрузки, равного 152 г

В результате проведенных опытов установлены значения коэффициента трения и силы сухого трения при монотонном нагружении. Однако, в чистом виде сухое трение не может использоваться в устройстве без упругих элементов, восстанавливающих первоначальное положение тел, участвующих в модели.

При этом, методикой проведения опытов было предусмотрено, что сдвигаемые элементы совершали прямолинейное движение на расстоянии, равном 30 мм. В связи с этим, при расчетном анализе возможного колебательного движения данное расстояние принималось в качестве начального условия при решении однородного дифференциального уравнения и определении амплитуды колебания.

При построении петли гистерезиса учитывались следующие положения динамики сооружений [3], касающиеся учета внутреннего трения материала:

а) при циклических деформациях идеально упругой линейной системы действующая на нее внешняя циклическая сила P прямо пропорциональна упругому перемещению z системы и зависимость $P(z)$ при нагрузке и разгрузке совпадают, представляя собой прямую линию;

б) для реальной системы, обладающей внутренним трением, эта зависимость нелинейна и двузначна и представляет собой при установившихся циклах нагрузки и разгрузки замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса. При гармонических колебаниях петля представляет собой эллипс с центом в начале координат (P, z) ;

в) площадь замкнутой петли гистерезиса пропорциональна работе ΔW , совершаемой силами внутреннего трения за один цикл деформации, а площадь треугольника ниже графика $P(z)$ от монотонного нагружения пропорциональна работе W упругих сил за четверть цикла при возрастании деформаций от 0 до максимума [3];

г) петля расположена в 1 и 3 квадрантах координат (P, z) и наклонена под некоторым углом относительно оси абсцисс.

При рассмотрении случая упруго-вязкого трения принято [3] в механическую модель включать как линейно-упругую пружину, так и элемент вязкого сопротивления в виде, например, цилиндра с вязкой жидкостью, или фрикционных устройств, отображающих влияние сухого трения. При этом, большая полуось эллипса будет определять амплитуду гармонических колебаний (пружины) A , а малая полуось эллипса - силу трения F_{sl} .

Кроме этого, упруго-линейное сопротивление S_A будет определять поворот местных осей эллипса относительно исходной оси абсцисс (рис.5).

Работа силы F_{sl} равна площади эллипса

$$\Delta W = \pi \cdot F_{sl} \cdot A \quad (7)$$

Такое количество работы необратимо затрачивается на преодоление сил трения за каждый цикл колебаний. Величина $W = 0,5 \cdot S_A \cdot A$ представляет потенциальную энергию деформации.

Отношение
$$\psi = \frac{\Delta W}{W} = \frac{\pi \cdot F_{sl}}{0,5 \cdot k \cdot A} \quad (8)$$

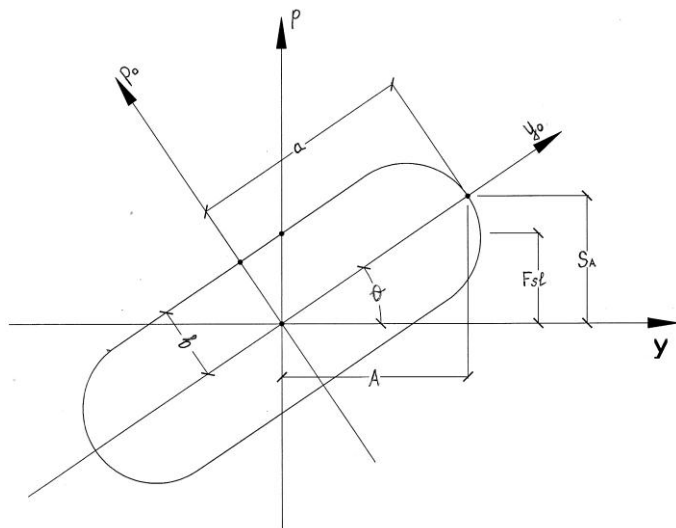


Рис 5. Схема определения параметров петли гистерезиса

где: $k = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot d_f^3 n}$ - жесткость пружины [3]; n - количество витков;

d - диаметр проволоки; d_f - диаметр намотки; G - модуль сдвига для пружинной стали $G = 78,5 \text{ ГПа}$; а ψ - называется коэффициентом поглощения энергии колебаний или диссипации, т.е. рассеивания энергии.

Анализ полученных опытных результатов и колебательного движения системы при помощи решения однородного дифференциального уравнения движения для осциллятора показал, что наибольшее затухание колебаний происходит при жесткости пружины $k = 1507 \text{ Н/м}$, что соответствует 5-ти витковой цилиндрической пружине с $d_f = 80 \text{ мм}$ и

$d = 5 \text{ мм}$. При этом, коэффициент диссипации составляет:

$$\psi = \frac{\pi \cdot F_{sl}}{0,5 \cdot k \cdot s} = \frac{3,14 \cdot 0,0178}{0,5 \cdot 1507 \cdot 0,03} \approx 2,5 ,$$

что показывает значительный вклад в процесс затухания сил трения.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные лабораторные эксперименты позволили определить характеристики бетонных элементов (силу трения и коэффициент трения);
2. Методика проведения исследований позволяет более обосновано подходить к определению массы опытных образцов и жесткости линейно-упругих элементов;
3. Вопросы решения задачи устойчивости колебательного процесса для условий сухого трения требуют дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальное исследование демпфирующих свойств некоторых материалов при статических нагрузках / [Шмуклер В.С., Кукунаев В.С., Псурцева Н.А., Потапов П.Г.] // European Applied Sciences. – Stuttgart (Germany): ORTPublishing, 2014. – Section 11: Technicalsciences. – P. 80-86.
2. Клованич С.Ф. Надежность и долговечность сооружений / Клованич С.Ф. - Одесса: ОНМУ, 2003. – 56 с.
3. Справочник по динамике сооружений; ред. Б.Г. Коренева и И.И. Рабиновича. - М.: Стройиздат, 1972. – 511 с.
4. [https://ru.wikipedia.org/wiki/ коэффициент упругости](https://ru.wikipedia.org/wiki/коэффициент_упругости).
5. Поляков С.В. Сейсмостойкие конструкции зданий (Основы теории сейсмостойкости) / Поляков С.В. - М.: Высшая школа, 1983. – 304 с.

REFERENCES

1. Experimental study of the damping properties of certain materials under static loads / // European Applied Sciences. - Stuttgart (Germany): ORT Publishing, 2014.- Section 11 Technical sciences.- P.80-86.
2. Klovaniich S.F. The reliability and durability of structures / Klovaniich S.F. - Odessa: ONMU, 2003. – 56 p.
3. Guide to the dynamics of structures; ed. B.G. Koreneva and I.I. Rabinovicha - M.: Sroyizdat, 1972. – 511 p.
4. [https://ru.wikipedia.org/wiki/ coefficient of elasticity](https://ru.wikipedia.org/wiki/coefficient_of_elasticity);
5. S.V. Polyakov. Seismic design of buildings (foundations of the theory of seismic resistance) / Polyakov S.V. - M.: Higher school, 1983. – 304 p.

Статья поступила в редакцию 25.08.2015 г.